不同灌溉模式下胡杨断根处理根蘖繁殖特征

王子康[1,2]， 焦阿永[3]， 凌红波[1]， 单钱娟[1,2]， 张广朋[1]， 王文琦[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003）

摘　要：为巩固塔里木河下游输水成效，需要采用适宜的灌溉方式并结合断根萌蘖技术，促进胡杨林的更新复壮及下游的生态修复。以往的研究很少将不同灌溉模式与断根萌蘖生态修复效果相结合。因此，根据地形特点将研究区分为A_1、A_2、A_3分区，对研究区开沟断根后，根据灌溉间隔、时长、水量的不同设置4种灌溉模式，具体为对照组（未进行灌溉的自然条件，F_1）；灌溉间隔11 d，每10 m断根沟的灌溉水量为6 m^3，灌溉持续时长2 d（F_2）；灌溉间隔23 d，每10 m断根沟的灌溉水量为7 m^3，灌溉持续时长3 d（F_3）；灌溉间隔33 d，每10 m断根沟的灌溉水量为8 m^3，灌溉持续时长4 d（F_4），调查在不同的灌溉处理下胡杨萌蘖更新情况。结果表明：（1）远端根萌蘖能力优于近端根，A_1、A_2、A_3分区内远端根的萌芽率分别为70.7%、77.1%、64.1%；胡杨萌蘖点距萌蘖根切面的距离集中在1~16 cm；萌蘖点与母树距离集中在5.5~7 m；萌蘖根分布深度集中在30~50 cm；萌蘖根直径集中在0.4~0.7 cm。（2）根据胡杨根蘖苗的萌发数量，确定了适宜胡杨根萌蘖的土壤温度以及含水率区间分别为26.5~28.1 ℃、10.6%~13.1%；适宜胡杨根蘖的灌溉模式为灌溉间隔23 d，每10 m断根沟的灌溉水量为7 m^3，灌溉时长3 d（F_3）。研究结果可为塔里木河流域胡杨林更新复壮提供参考。

关键词：塔里木河下游；胡杨林；开沟断根；根蘖苗；更新复壮

塔里木河位于新疆，是中国最长的内陆河；胡杨（*Populus euphratica*）作为塔里木河流域典型的物种，在我国西北干旱荒漠区是唯一能独自成林的乔木树种。由胡杨林作为主体构成的绿色长廊阻挡了库鲁克与塔克拉玛干两大沙漠合拢[1]。但20世纪50年代以来，特别是1972年大西海子水库修建后，塔里木河下游350 km河道发生断流，造成胡杨林面积锐减[3-5]，胡杨林呈现衰败状况[6]。为改善濒临绝境的生态环境，自2000年开始向大西海子水库下游河道实施生态输水，生态环境得到初步改善[7]。但生态输水仅可修复集中在距离河道1 km的范围内的植被，生态修复范围有限[8]。为巩固和提升下游生态输水成效，必须改变单河道输水方式，在适宜的区域内形成双河道、沟道、汊河的轮渗灌溉方式，增加生态修复面积[1,7]，并结合胡杨断根萌蘖，促进生态保护与修复。

胡杨最初主要依靠种子繁殖进行种群更新，由于水资源匮乏以及人类活动影响导致胡杨依靠有性繁殖进行种群更新受到限制，因此我国胡杨大部分通过克隆繁殖——根蘖来进行种群更新[9-11]。胡杨根蘖繁殖能力较强，在适宜环境条件下，会在四周丛生大量根蘖苗[12]。研究表明，实施引洪灌溉、开沟断根可以促进根蘖萌发，为胡杨种群更新创造条件[13]；根系是胡杨根蘖繁殖的主要载体，胡杨侧根根系发达，多为细根[14]；而具有根蘖能力的根系多为细根，具有根蘖能力的根系不具有坚硬的木质层[11]。当根系直径大于4 cm时，几乎没有萌蘖能力[15]，胡杨繁殖根的近端根（连接母株与根蘖苗）与远端根（远离母株）在形态分布上有较大差异，胡杨根蘖苗在生长初期由于结构简单，没有能力摄取维持自身生长所需的养分，因此需要通过近端根摄取养分，同时需要扩大远端根的分布以获取更多资

收稿日期：2021-11-02；　**修订日期**：2022-01-14
基金项目：新疆水利科技专项资金项目（XSKJ-2022-10）；中国科学院“西部青年学者”项目（2019-XBQNXZ-A-001）；新疆天山青年计划（2019Q006）；科技基础资源调查专项（2019FY100203）共同资助
作者简介：王子康（1997-），女，硕士研究生，主要从事干旱区水文过程研究. E-mail: wangzikang97@163.com
通讯作者：凌红波. E-mail: linghongbo0929@163.com

源[16-18]。胡杨萌蘖根分布的深度范围会因地理位置的不同而产生差异，胡杨根蘖苗萌发位置集中在距地表40 cm土层以内的横走侧根上[19-21]。目前，有关胡杨克隆繁殖的研究成为国内外胡杨保护的研究热点[12,14]，开沟断根是一种在胡杨母树周围开挖环形沟或平行沟并斩断根系的人工促进更新技术[22]，但对于胡杨开沟断根的研究主要集中在胡杨根蘖苗的萌发、数量以及性状与环境因子的探讨，相关理论研究缺乏对不同灌溉方式下胡杨断根萌蘖效果的研究。本文对研究区开沟断根后采用不同梯度的灌溉方式，调查胡杨根蘖苗的数量、生长状况、胡杨地下萌蘖根根系特征，掌握开沟断根后胡杨萌蘖根繁殖的基本特征，提出适宜胡杨萌蘖的土壤温湿度条件、灌溉方式以及开沟断根规范，对塔里木河下游胡杨林的保护以及恢复具有重要意义。

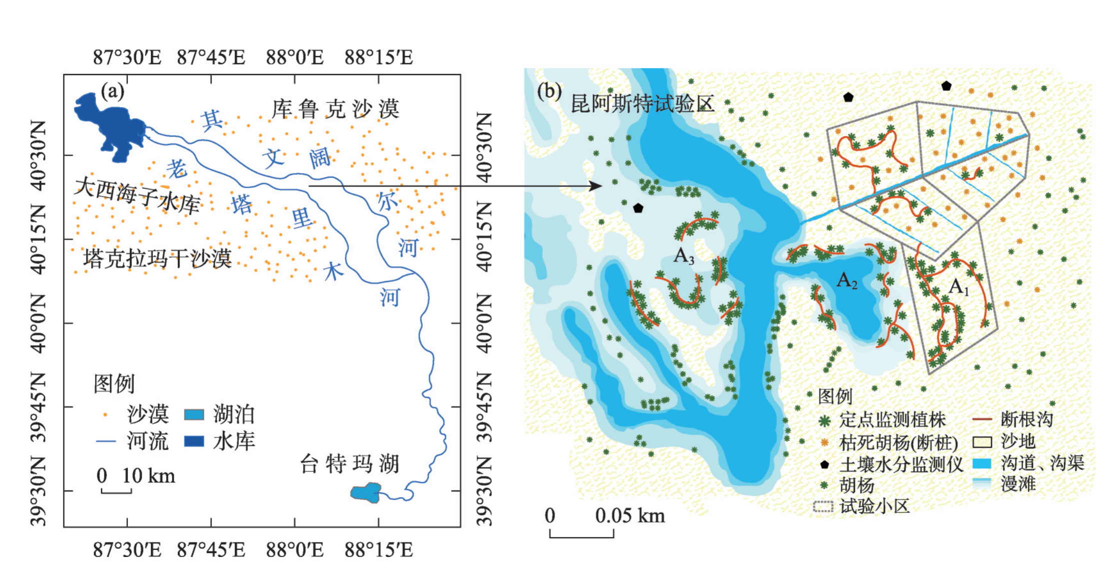
1 研究区概况

塔里木河流域(34°20′~43°39′N，71°39′~93°45′E)位于中国新疆南部，与塔克拉玛干沙漠毗邻。塔里木河是典型的干旱区内陆河，属于典型的大陆性干旱气候，平均气温为10.6~11.5 ℃，源头区和干流区的年降水量分别为80~200 mm和10~50 mm。该区域的荒漠河岸植被以胡杨和多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)为主，草本植物以芦苇(*Phragmites australis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)为主[23]。

塔里木河下游位于新疆若羌县和尉犁县境内，长约320 km，为大西海子水库至台特玛湖河段，是塔里木河流域生态环境最脆弱的区域[24]。该河段被尉若分水闸分为老塔里木河和其文阔尔河两支[1]。塔里木河下游断流以后，荒漠植被大面积枯萎，生态系统严重退化。自2000年生态输水工程实施以来，地下水位抬升，沿岸植被以及生态环境得到修复[24]。由于河道断流和生态输水两大事件，不仅使塔里木河成为受人类干扰导致生态退化最为严重的区域，也成为通过人为干预促进生态修复最为典型的区域[25]。研究选取塔里木河下游由昆阿斯特生态闸控制的河段为试验区，该河段地理位置处于其文阔尔河与老塔里木河河道之间，具有生态闸和堵水坝等水利工程以及众多沟汊构成的水网，并且该地段的胡杨分布较集中且空间异质性较强，是进行试验的理想场所。依据胡杨生境条件的代表性和一致性原则，根据试验区地形特点以及成年胡杨分布，选择成年胡杨长势差异较小的3块样地，样地分别命名为断根萌蘖 A_1、A_2、A_3 区，以下简称为 A_1、A_2、A_3(图1)。

2 研究方法

(1) 胡杨开沟断根：根据胡杨物候特点，在2021年3月底至4月初，胡杨母株尚未萌芽时[26]，根据试验区地形，选择土壤水分持水较好，胡杨母株生长状况较好，向阳一侧地段，距母株5~10 m处开挖断



注：A_1、A_2、A_3表示不同的试验分区。

图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Sketchy map of the studied area, A_1, A_2 and A_3 represent sample site

根沟[27]，沟深70~90 cm，宽30~50 cm[28]，长15~20 m，整个研究区共计开沟18条。开沟断根后，对于距表层土壤30 cm处，根径为1~3 cm的胡杨水平根进行人工切断，根径为1 cm以下、3 cm以上的水平根保留，实施人工切断水平根的方式有利于促进根蘖苗的萌发[27]。

（2）灌溉：在每个分区内利用HOBO Ware（U21-USB）仪器监测断根沟内土壤含水率（体积含水率）、温度变化，共计有30 cm、50 cm、75 cm、100 cm、150 cm 5个监测深度[29]。当土壤含水率在6.0%~30.0%时，适宜胡杨根系生长[30]，开沟断根后，在未进行灌溉的自然状态下，调查1次根蘖苗萌发数量（表1灌溉模式F_1），根据仪器监测数据记录1次土壤含水率。为保证胡杨根系正常生长，根据适宜胡杨根系生长的土壤含水率区间以及试验区地形和水文特征，设置了3种灌溉模式，分别为灌溉间隔11 d，每10 m断根沟的灌溉水量为6 m^3，灌溉持续时长2 d（F_2）；灌溉间隔23 d，每10 m断根沟的灌溉水量为7 m^3，灌溉持续时长3 d（F_3）；灌溉间隔33 d，每10 m断根沟的灌溉水量为8 m^3，灌溉持续时长4 d（F_4）（表1 F_2、F_3、F_4），A_1、A_2、A_3分区分别采用F_2、F_3、F_4的灌溉模式。灌溉后，利用HOBO Ware仪器实时监测土壤含水率。灌溉结束后调查萌芽更新情况，根据不同监测区域内根蘖苗萌发数量及土壤温湿度变化，确定最适宜萌发的土壤温湿度区间值。

表1　胡杨根蘖苗的灌溉模式

Tab. 1　Irrigation mode of root sucker seedling of *Populus euphratica*

灌溉模式	灌溉间隔/d	灌溉水量/[m^3·(10m)$^{-1}$]	灌溉持续时长/d
F_1	0	0	0
F_2	11	6	2
F_3	23	7	3
F_4	33	8	4

（3）萌芽更新调查：试验周期为2021年5—8月，灌溉结束后每间隔3 d调查1次根蘖苗萌发情况。在A_1、A_2、A_3分区中各选择3条断根沟，共计9条沟，每条沟的沟长约15 m。将15 m长的断根沟每隔5 m分为1条监测样带，对于每1条监测样带，选择根蘖苗萌发数量、株高、萌蘖根直径、萌蘖根分布深度、根蘖苗距母树距离、萌蘖点距萌蘖根切面距离为主要监测指标[13,16,21,27]，监测每条样带内胡杨幼苗更新情况，具体监测方法如下：

株高：以每株根蘖苗的最高主枝为准，用钢卷尺重复测量（精确到0.1 cm）3次，最终结果取平均值。

萌蘖根直径：以每株根蘖苗附近的萌蘖根为测量对象，用十分之一精度的游标卡尺进行测量（精确到0.01 cm），实际测量发现根蘖苗两侧的萌蘖根直径不同，故对每株幼苗两端的萌蘖根均进行测量，并取平均值作为该萌蘖根的直径，每端测量均重复3次。

根蘖苗距母树距离：以每株根蘖苗的中心距离为准，利用皮尺测量其到胡杨母树的直线距离（精确到0.01 cm），重复测量3次，最终结果取平均值。

萌蘖根分布深度：以每株胡杨根蘖苗附近的萌蘖根为测量对象，用钢卷尺重复测量萌蘖根到地面的垂直距离（精确到0.1 cm）3次，最终结果取平均值。

萌蘖点距萌蘖根切面距离：以每株胡杨根蘖苗在萌蘖根上的萌蘖点为研究对象，用钢卷尺重复测量萌蘖点到该萌蘖根切面的直线距离（精确到0.1 cm）3次，最终结果取平均值。

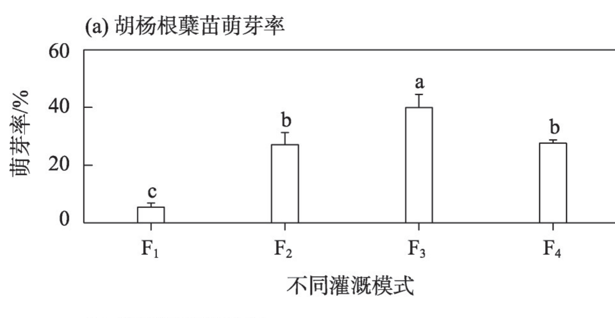
（4）数据处理与分析：调查统计数据录入Excel表格中，计算各指标参数的均值，以均值大小进行作图比较。用SPSS 20软件进行单因素方差分析和主成分分析，用LSD法进行差异显著性分析。采用ArcGIS 10.5和Origin 2018软件进行作图。

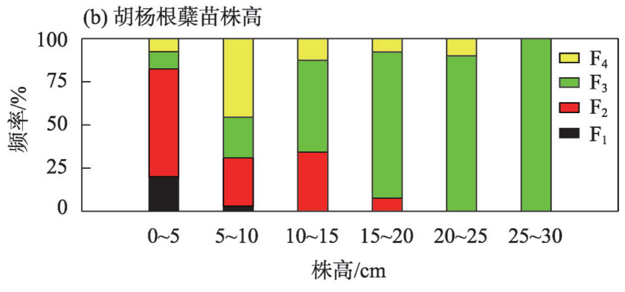
3　结果与分析

3.1　胡杨根蘖苗的发生数量和生长状况

在图2a中，在F_1、F_2、F_3、F_4灌溉模式下，胡杨根蘖苗的萌芽率分别为5.4%、27.1%、39.9%和27.6%。在F_3灌溉模式下，根蘖苗的萌芽率显著高于其他灌溉模式下的萌芽率。根据图2b，在不同灌溉模式下，萌蘖苗株高有较大差异；其中在F_1、F_2灌溉模式下，根蘖苗株高主要分布在0~5 cm；F_3灌溉模式下，根蘖苗株高主要分布在15~30 cm；F_4灌溉模式下，根蘖苗株高主要分布在5~10 cm。表明在F_3灌溉模式下，根蘖苗萌芽率、株高较高。

断根沟两侧胡杨根蘖苗萌芽更新情况有较大差异（图3a），在图3b中，断根沟中远端根一侧根蘖苗的萌芽率高于近端根一侧；在A_1、A_2、A_3试验分区





注：数值为平均值(Mean)±标准误差(SEM)；图中小写字母表示不同灌溉模式下萌芽率是否存在显著差异(显著水平α=0.05)。

图2　不同灌溉模式下的胡杨根孽情况

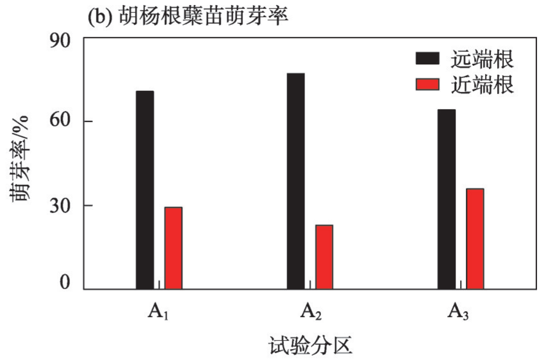
Fig. 2　Root tillering of *Populus euphratica* under different irrigation modes

中，远端根一侧的根蘖苗萌芽率分别为70.7%、77.1%、64.1%。近端根一侧根蘖苗株高集中在5~10 cm，其次为0~5 cm、10~15 cm，近端根一侧根蘖苗株高在0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm所占比例分别为20.1%、37.6%、22.5%；远端根一侧根蘖苗株高集中在20~25 cm，其次为25~30 cm，所占比例分别为27.2%、20.7%(图3c)。

3.2　胡杨根蘖苗性状特征

由图4a可知，总体上，胡杨萌蘖根直径分布范围集中在0.4~0.7 cm，出现在该范围内的萌蘖根数量占调查总数的37.8%；在A_1、A_2、A_3试验分区中，直径在0.4~0.7 cm范围的胡杨萌蘖根出现频率最高，分别为33.0%、46.2%、47.6%。显著性分析结果表明3个试验分区中胡杨萌蘖根直径没有显著差异(图5a)。在图4b中，胡杨根蘖苗与母树距离多集中在5.5~7 m，占调查总数的35.9%；不同试验分区中，在A_1、A_3试验分区，根蘖苗与母树距离多集中在5.5~7 m，分别占各自试验分区内调查总数的44.8%、42.9%；在A_2试验分区集中在8.5~10 m，占该分区调查总数的30.0%。A_2试验分区中根蘖苗与母树距离显著高于A_1分区(图5b)。根据图4c可知，萌蘖根分布深度集中在30~50 cm，占调查总数的62.6%；不同试验分区中，萌蘖根分布深度集中在30~50 cm，分别占各自试验分区内调查总数的63.6%、53.3%、71.4%。3个试验分区中萌蘖根分布深度没有显著





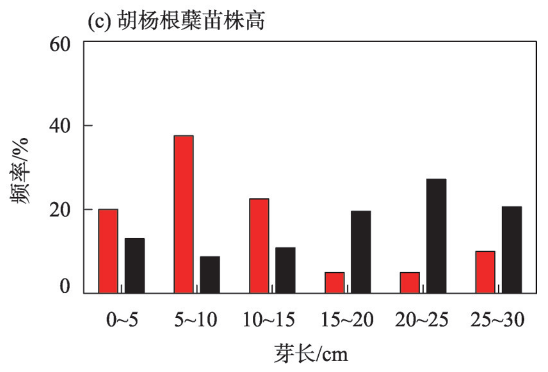


图3　断根沟两侧胡杨根蘖苗萌发情况

Fig. 3　Sprout of root sucker seedling of *Populus euphratica* on both sides of root cutting ditch

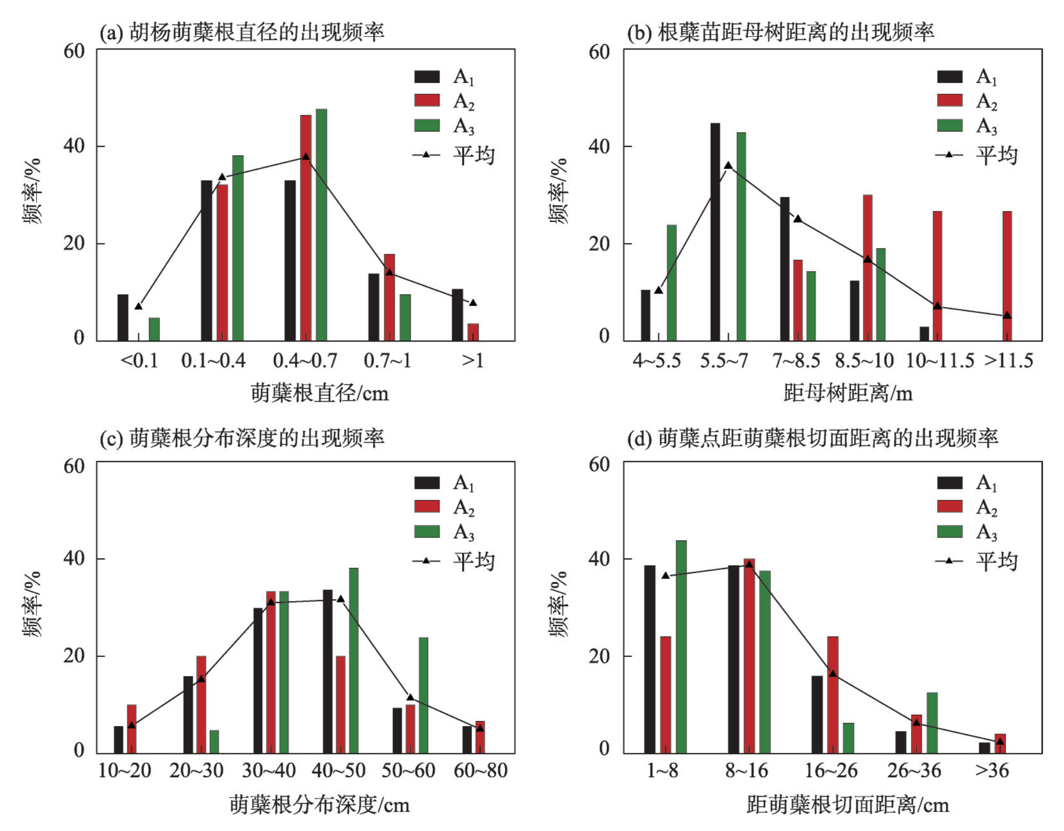
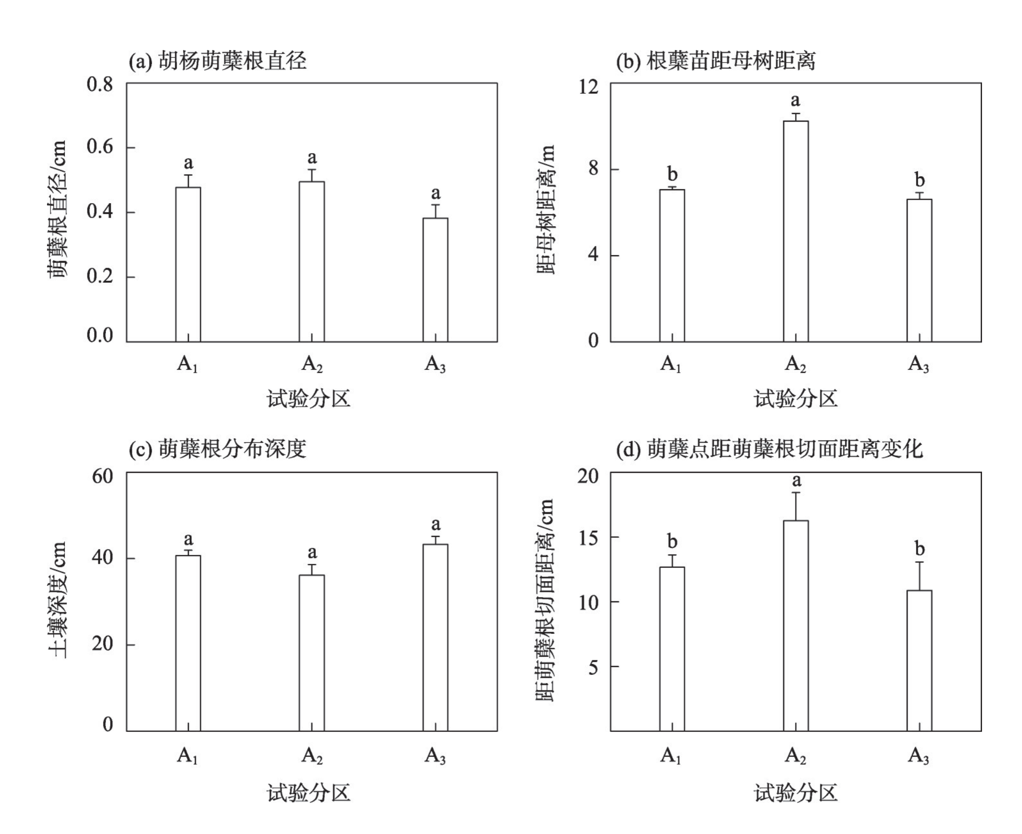


图4　胡杨根蘖更新特征

Fig. 4　Characteristics of new suckers of the *Populus euphratica* root



注：数值为平均值(Mean)±标准误差(SEM)；图中小写字母表示不同试验分区下变量是否存在显著差异(显著水平α=0.05)。

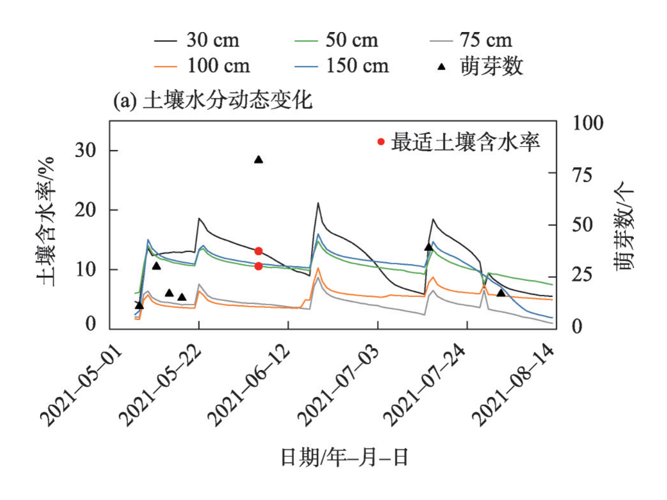
图5　不同试验分区中胡杨根蘖特征变化

Fig. 5　Changes of new sucker characteristics of the *Populus euphratica* root in different test zones

差异(图5c)。根据图4d可知,萌蘖点距萌蘖根切面的距离集中分布在1~16 cm,占调查总数的75.2%;不同试验分区中,在A_1、A_3中萌蘖点距萌蘖根切面的距离集中在1~8 cm,分别占各自试验分区内调查总数的38.6%、43.8%,A_2试验分区集中在8~16 cm,占该分区调查总数的40.0%。A_2试验分区中萌蘖点距萌蘖根切面的距离显著高于A_1分区(图5d)。根据本研究结果,在距离母树5.5~7.0 m范围内开挖断根沟有利于胡杨萌蘖,萌蘖根直径应为小于1 cm的细小根系,萌蘖根的分布深度为30~50 cm。

3.3 土壤温湿度对胡杨根蘖苗数量的影响

在试验期内,30 cm、50 cm、75 cm、100 cm、150 cm土层的土壤水分、温度动态变化如图6。根据图6a可知,灌溉后土壤含水率出现较大波动,土壤含水率达到饱和后呈现衰减,其中30 cm土层的土壤含水率变化波动最大。50 cm、75 cm、100 cm、150 cm土层的土壤水分明显低于30 cm土层土壤含水率。灌溉后土壤温度没有较大波动,在试验期内,不同土层的土壤温度均呈现逐渐上升趋势(图6b)。



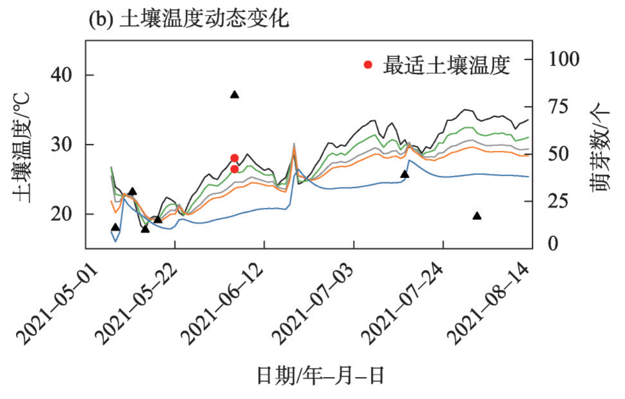


图6 灌溉影响下土壤温湿度动态变化及最适胡杨根蘖的土壤温湿度

Fig. 6 Dynamic changes of soil temperature and humidity under irrigation and optimal soil temperature and humidity most suitable for *Populus euphratica* root

根据胡杨断根萌芽更新情况,当萌蘖根深度在30~50 cm范围时,最有利于根蘖苗萌发(图4c),根据断根沟内胡杨根蘖苗的萌芽数,当30~50 cm土层的土壤含水率分别为13.1%、10.6%,土壤温度分别为28.1 ℃、26.5 ℃时,萌芽数最高(图6)。因此,根据胡杨根蘖苗的萌芽数以及萌蘖根分布深度,确定最有利于根蘖苗萌发的土壤含水率、土壤温度分别为10.6%~13.1%、26.5~28.1 ℃(图6)。

4 讨 论

开沟断根是恢复胡杨林的有效措施之一[13],根据本研究结果,开沟断根后胡杨根蘖效果明显(图7)。在胡杨母树周围开挖断根沟有利于胡杨幼苗更新,断根沟与母树的间隔不宜超过10 m,其中以5 m左右最适宜[13,27]。研究表明,具有根蘖能力的萌蘖根直径集中在小于1 cm,分布在距土壤表层5~40 cm的浅层土壤[14,19];胡杨具有浅根性的特点,萌蘖根分布深度较浅[14,31];随着土壤深度的增加,土壤通气状况变差,增加了根蘖苗自然生长的阻力,故根蘖苗难以在深层土中生长[32]。在本研究中,萌蘖根直径在0.4~0.7 cm的范围时有利于根蘖苗萌发,萌蘖根的分布深度集中在30~50 cm的浅层土壤,开挖断根沟时,与母树距离不能超过7 m,以5.5~7 m为宜。胡杨近端根与远端根根蘖能力有较大差异,近端根的萌蘖数量较远端根少[16]。直径大的近端根木质化程度高,分生组织活力低,根蘖能力弱于新生的远端根[15–16]。在本研究中具体表现为远端根比近端根的萌蘖能力强,在A_1、A_2、A_3试验分区中,远端根一侧的根蘖苗萌芽率分别为70.7%、77.1%、64.1%,明显高于近端根一侧,并且远端根一侧根蘖苗株高高于近端根,集中分布在20~25 cm。开沟断根技术可以有效地促进胡杨老树的萌蘖更新,通过人工干预,有利于水资源短缺的干旱区胡杨更新复壮,但不适于胡杨幼树的更新发育,未来的工作重点需要转移到如何保证幼树、幼林的更新[22]。

胡杨的根蘖繁殖会受到土壤根际环境、根系分布的影响[14,33–34]。另外,土壤含水量与根蘖苗的萌发数量、生长高度以及每个根蘖节的产苗数量呈显著正相关关系($P<0.05$)[14]。胡杨幼苗对环境因素更敏感,易受根系分布、水分、土壤条件的影响[16]。在本















注:(a)断根沟;(b)根蘖苗出苗;(c)根蘖苗生长;(d)根蘖苗生长;(e)根蘖苗;(f)胡杨根蘖更新效果;(g)胡杨根蘖更新效果。

图7 胡杨断根萌蘖的过程

Fig. 7 Process of new suckers of the *Populus euphratica* root

研究中,对影响根蘖苗萌发的土壤因素以及根系特点进行主成分分析,结果表明前3个主成分的累积贡献率达到90.39%(表2),第一主成分与X_3、X_4、X_5、X_6存在较强的正相关关系,胡杨萌蘖根的根系分布是影响根蘖苗萌发的关键因素,第二、三主成分与土壤温度、含水率存在较强的正相关关系,表明土壤温度、含水率对根蘖苗萌发也产生了一定的影响(图8)。因此,在本研究中胡杨的根蘖繁殖受土壤温湿度、根系分布的影响,胡杨的根系分布是影响根蘖苗萌发的关键因素[6,13]。

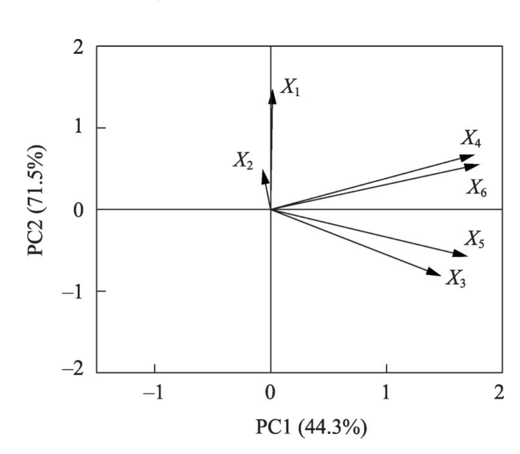
生态输水是河流生态系统的重要环节,是荒漠河岸林生态系统的一个重要影响因子[34]。自2016年"胡杨林保护行动"开展后,实施河水淹灌改善了局部的生态环境,在河水淹灌区域出现了大面积的

表2 主成分分析结果

Tab. 2 Principal component analysis results

	第一主成分	第二主成分	第三主成分
X_1	0.008	0.920	−0.190
X_2	−0.031	0.294	0.941
X_3	0.709	−0.513	−0.210
X_4	0.851	0.425	−0.121
X_5	0.821	−0.363	0.392
X_6	0.869	0.348	−0.044
特征值	2.658	1.630	1.136
成分贡献率/%	44.292	27.161	18.941
累计贡献率/%	44.292	71.453	90.394

注:X_1表示土壤温度;X_2表示土壤含水率;X_3表示萌蘖根直径;X_4表示萌蘖根分布深度;X_5表示根蘖苗距母树距离;X_6表示萌蘖点距萌蘖根切面距离。



注:X_1表示土壤温度;X_2表示土壤含水率;X_3表示萌蘖根直径;X_4表示萌蘖根分布深度;X_5表示根蘖苗距母树距离;X_6表示萌蘖点距萌蘖根切面距离。

图8 基于影响根蘖苗萌发因素的主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis based on factors affecting root tiller seedling germination

胡杨幼苗[35]。灌溉是恢复胡杨林生机，促进根蘖苗萌发的必要条件[13]。本研究通过设置不同的灌溉模式，确定最适宜胡杨根蘖的灌溉模式为灌溉间隔23 d，每10 m断根沟的灌溉水量为7 m^3，共计灌溉时长3 d，本研究结果对塔里木河流域胡杨林更新以及水资源高效利用具有重要指导意义。

5 结 论

本文以塔里木河下游为例，研究开沟断根后胡杨根蘖萌芽更新规律。

（1）开沟断根有利于胡杨更新，在F_3灌溉模式下根蘖苗萌发率最高，萌发率为39.9%，根蘖苗株高集中在15~30 cm；远端根一侧的萌发率均高于近端根一侧，不同灌溉模式下，远端根一侧的萌发率分别为70.7%、77.1%、64.1%，株高集中在20~25 cm；胡杨地下萌蘖根多出现在30~50 cm的土层深度，直径在0.4~0.7 cm的范围内，萌蘖点距母树的距离集中在5.5~7 m，距萌蘖根切面的距离集中在1~16 cm。

（2）萌蘖根直径、萌蘖根分布深度、根蘖苗距母树距离、萌蘖点距萌蘖根切面距离等因素是影响根蘖苗萌发的关键因素，其次为土壤温度、含水率。提高胡杨根蘖萌发率的适宜土壤温度以及含水率区间分别为26.5~28.1℃、10.6%~13.1%。根据灌溉后根蘖苗萌发率、株高确定最适宜胡杨根蘖的灌溉模式为灌溉间隔23 d，每10 m断根沟的灌溉水量为7 m^3，共计灌溉时长3 d。

参考文献（References）：

[1] 王根绪, 程国栋. 干旱荒漠绿洲景观空间格局及其受水资源条件的影响分析[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 363-368. [Wang Genxu, Cheng Guodong. The spatial pattern and influence caused by water resources in arid desert oases[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3): 363-368.]

[2] 孔子洁, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游河道断流区生态安全评估与生态恢复对策[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1128-1139. [Kong Zijie, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Ecological security assessment and ecological restoration countermeasures in the dry-up area of the lower Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1128-1139.]

[3] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247.]

[4] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等. 间歇性输水影响下的2001—2011年塔里木河下游生态环境变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1251-1262. [Huang Yue, Bao Anming, Wang Shifei, et al. Eco-environmental change in the lower Tarim River under the influence of intermittent water transport [J]. Acta Geographical Sinica, 2013, 68(9): 1251-1262.]

[5] Chen Y, Li W, Xu C, et al. Desert riparian vegetation and groundwater in the lower reaches of the Tarim River basin [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 547-558.

[6] 赵万羽, 陈亚宁, 周洪华, 等. 塔里木河下游生态输水后衰败胡杨林更新能力与条件分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 108-113. [Zhao Wanyu, Chen Yaning, Zhou Honghua, et al. Reproductive ability and relative environment factors of degraded *Populus euphratica* forest in ecological water delivery project at lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 108-113.]

[7] 李梦怡, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 39-47. [Li Mengyi, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Evaluation of ecological water security and analysis of driving factors in the lower Tarim River, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 39-47.]

[8] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J] 干旱区研究, 2017, 34(4): 717-726. [Deng Mingjiang, Yang Pengnian, Zhou Haiying, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 717-726.]

[9] Gutierrez J R, Arancio G, Jaksic F M. Variation in vegetation and seed bank in a Chilean semi-arid community affected by ENSO 1997[J]. Journal of Vegetation Science, 2000, 11(5): 641-648.

[10] 赵文智, 常学礼, 李秋艳. 人工调水对额济纳胡杨荒漠河岸林繁殖的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1987-1993. [Zhao Wenzhi, Chang Xueli, Li Qiuyan. Artificial water diversion effects of Heihe River on *Populus euphratica* Oliv. desert riparian forests in Ejina [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 1987-1993.]

[11] 叶子奇, 邓如军, 王雨辰, 等. 胡杨繁殖根系分枝特征及其与土壤因子的关联性[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 31-39. [Ye Ziqi, Deng Rujun, Wang Yuchen, et al. Branching patterns of clonal root of *Populus euphratica* and its associations with soil factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 31-39.]

[12] 黄晶晶, 井家林, 曹德昌, 等. 不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4331-4342. [Huang Jingjing, Jing Jialin, Cao Dechang, et al. Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4331-4342.]

[13] 朱玉伟, 桑巴叶, 陈启民, 等. 和田河流域胡杨林更新复壮技术[J]. 南方农业学报, 2012, 43(10): 1544-1548. [Zhu Yuwei, Sang Baye, Chen Qimin, et al. Rejuvenation techniques of *P. euphratica* forest in Hetian River Basin[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(10): 1544-1548.]

[14] 郑亚琼, 张肖, 梁继业, 等. 濒危物种胡杨和灰叶胡杨的克隆生长特征[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1331-1341. [Zheng Yaqiong, Zhang Xiao, Liang Jiye, et al. Clonal growth characteristics of the endangered species *Populus euphratica* Oliv. and *Populus pruinosa* schrenk[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1331-1341.]

[15] 张昊, 李俊清, 李景文, 等. 额济纳绿洲胡杨种群繁殖物候节律特征的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2007, 28(2): 60-66. [Zhang Hao, Li Junqing, Li Jingwen, et al. The reproductive phenological rhythm characteristice of *Populus euphratica* Oliv. population in the egina oasis of Inner Momgolia[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2007, 28(2): 60-66.]

[16] 王雨辰, 王文娟, 钟悦鸣, 等. 胡杨繁殖根扩展行为及其影响因子研究[J]. 植物科学学报, 2020, 38(3): 410-417. [Wang Yuchen, Wang Wenjuan, Zhong Yueming, et al. Study on the foraging behavior of clonal roots and its influencing factors in *Populus euphratica* Oliv.[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(3): 410-417.]

[17] Klimesova J, Pokorna A, Klimes L. Establishment growth and bud-bank formation in *Epilobium angustifolium*: The effects of nutrient availability, plant injury, and environmental heterogeneity[J]. Botany-Botanique, 2009, 87(2): 195-201.

[18] Bartuskova A, Klimesova J. Reiteration in the short lived root-sprouting herb *Rorippa palustris*: Does the origin of buds matter?[J]. Botany, 2010, 88(7): 630-638.

[19] 武逢平, 李俊清, 李景文, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)在额济纳绿洲三种生境内的根蘖繁殖特性[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4703-4709. [Wu Fengping, Li Junqing, Li Jingwen, et al. The charactertics of root suckers of *Populus euphratica* Oliv. in three habitats of Ejina Oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4703-4709.]

[20] 李志军, 刘建平, 于军, 等. 胡杨、灰叶胡杨生物生态学特性调查[J]. 西北植物学报, 2003, 23(7): 236-240. [Li Zhijun, Liu Jianping, Yu Jun, et al. Investigation on the characteristics of biology and ecology of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(7): 236-240.]

[21] 曹德昌, 李景文, 陈维强, 等. 额济纳绿洲不同林隙胡杨根蘖的发生特征[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1954-1961. [Cao Dechang, Li Jingwen, Chen Weiqiang, et al. Development and growth of root suckers of *Populus euphratica* in different forest gaps in Ejina Oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1954-1961.]

[22] 孙洪祥, 姚云峰. 额济纳绿洲胡杨林更新复壮技术研究[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(增刊 1): 69-73. [Sun Hongxiang, Yao Yunfeng. Study on technology of diversiform-leaved poplar forest regeneration and restoration of Ejina Oasis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(Suppl. 1): 69-73.]

[23] Ling H B, Zhang P, Xu H L, et al. Determining the ecological water allocation in a hyper-arid catchment with increasing competition for water resources[J]. Global and Planetary Change, 2016, 145: 143-152.

[24] 李均力, 肖昊, 沈占锋, 等. 2013—2018年塔里木河下游植被动态变化及其对生态输水的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 985-992. [Li Junli, Xiao Hao, Shen Zhanfeng, et al. Vegetation changes during the 2013-2018 period and its response to ecological water transport in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 985-992.]

[25] Ling H B, Guo B, Zhang G P, et al. Evaluation of the ecological protective effect of the "large basin" comprehensive management system in the Tarim River basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1696-1706.

[26] 张文霞, 刘普幸, 冯青荣, 等. 1960—2015年中国绿洲胡杨生长季对全球变暖的时空响应及原因[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1151-1162. [Zhang Wenxia, Liu Puxing, Feng Qingrong, et al. Spatial and temporal response and its causes of the growing season of *Populus euphratica* to global warming in China's oases during 1960-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1151-1162.]

[27] 田永祯, 司建华, 程业森, 等. 荒漠河谷胡杨残林复壮更新试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 155-159. [Tian Yongzhen, Si Jianhua, Cheng Yesen, et al. Experimental study on rejuvenation and regeneration of residual *Populus euphratica* forest in desert valley[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(9): 155-159.]

[28] 韩建华, 周芳, 张丽霞, 等. 构筑北方生态安全屏障——四子王旗胡杨林自然繁殖及人工更新探讨[J]. 林业科技情报, 2021, 53(2): 19-22. [Han Jianhua, Zhou Fang, Zhang Lixia, et al. Construct the ecological security barrier in the north-discussion on natura reproduction and artificial regeneration of *Populus euphratica* in Siziwang Banner[J]. Forestry Science and Technology Information Linye Keji QingBao, 2021, 53(2): 19-22.]

[29] 裴宏伟, 张红娟, 李雅丽, 等. 中国北方城市草坪蒸散特征及影响因素研究——以河北张家口市某早熟禾草坪为例[J]. 节水灌溉, 2021(11): 1-14. [Pei Hongwei, Zhang Hongjuan, Li Yali, et al. Characteristics and drivers of turf evapotranspiration in northern China: A case study of turf (*Poa pratensis*) in Zhangjiakou City, Hebei Province[J]. Water Saving Irrigation, 2021(11): 1-14.]

[30] 冯起, 司建华, 常宗强, 等. 极端干旱区胡杨根系分布对土壤水分的响应[J] 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 186-190. [Feng Qi, Si Jianhua, Chang Zongqiang, et al. Response of root distribution of *Populus euphratica* Oliv. to soil moisture content in extreme arid region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(11): 186-190.]

[31] 冯起, 司建华, 李建林, 等. 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立[J] 地球科学进展, 2008, 23(7): 765-772. [Feng Qi, Si Jianhua, Li Jianlin, et al. Feature of root distribution of *Populus euphratica* and its water uptake model in extreme arid region[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(7): 765-772.]

[32] 朱雅娟, 董鸣, 黄振英. 种子萌发和幼苗生长对沙丘环境的适应机制[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 137-142. [Zhu Yajuan, Dong Ming, Huang Zhenying. Adaptation strategies of seed germination and seedling growth to sand dune environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 137-142.]

[33] 李鹏, 赵忠, 李占斌, 等. 植被根系与生态环境相互作用机制研

究进展[J]. 西北林学院学报, 2002, 17(2): 26−32. [Li Peng, Zhao Zhong, Li Zhanbin, et al. Advances on the interactional mechanism between root system and eco-enviroment[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(2): 26−32.]

[34] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3) : 3−8. [Li Xinrong, Ma Fengyun, Long Liqun, et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in shapotou area[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 3−8.]

[35] 高生峰, 叶茂. 塔里木河上、中游极端干旱区淹灌对胡杨(*Populus euphratica*)长势的影响[J]. 生态科学, 2020, 39(2): 50−57. [Gao Shengfeng, Ye Mao. Effect of flood on growth of *Populus euphratica* in extreme arid region in the upper and middle reaches of Tarim River for example[J]. Ecological Science, 2020, 39(2): 50−57.]

Characteristics of *Populus euphratica* root under various irrigation modes

WANG Zikang[1,2], JIAO Ayong[3], LING Hongbo[1], SHAN Qianjuan[1,2], ZHANG Guangpeng[1], WANG Wenqi[1,2]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (CAS), Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Water Conservancy and Construction Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China)

Abstract: With the improvement of water resource management in Tarim River basin, the ecological environment in the lower reaches of Tarim River has been improved after ecological water diversion. Adopting appropriate irrigation methods combined with ecological restoration technology such as root cutting and sprouting is necessary to consolidate the effect of downstream water transfer, thereby promoting the regeneration and rejuvenation of *Populus euphratica* forest and the ecological protection and restoration of downstream. However, few studies have combined different irrigation patterns with ecological restoration effects of root cutting and sprouting. In this regard, this study was divided into A_1, A_2, and A_3 in accordance with the terrain characteristics of the study area. Irrigation modes of different treatments were adopted after ditching and root cutting in the study area. Four irrigation modes were set in accordance with the water quantity of irrigation interval, and the specific control group was referred to as F_1. The irrigation interval was 11 days; the irrigation water amount was 6 m^3 every 10 m, and the irrigation duration was 2 days (F_2). The irrigation interval was 23 days; the irrigation water amount was 7 m^3 every 10 m, and the irrigation duration was 3 days (F_3). In investigating the sprout renewal situation of *Populus euphratica* under different irrigation treatments, the irrigation interval was 33 days; the irrigation water amount was 8 m^3 every 10 m, and the irrigation duration was 4 days (F_4). Results showed that the germination ability of distal roots was better than that of proximal roots, and the germination rate of distal roots in A_1, A_2, and A_3 zones was 70.7%, 77.1%, and 64.1%, respectively. The distance between the sprout point and sprout root section of *Populus euphratica* was concentrated in 1−16 cm. In addition, the distance between the root sprout seedling and parent tree was 5.5−7 m. The distribution depth of the sprout root was concentrated in 30−50 cm. The diameter of the sprout root was concentrated in 0.4−0.7 cm. Based on the germination number of the root and tillering seedlings of *Populus euphratica*, the optimum soil temperature and water content were determined to be 26.5−28.1 ℃ and 10.6%−13.1%, respectively. The suitable irrigation mode for *Populus euphratica* root cutting ditch was 23-day interval, and the irrigation water amount was 7 m^3 per 10 m root ditch. Moreover, the irrigation duration was 3 days (F_3). The results can provide reference for the regeneration and rejuvenation of *Populus euphratica* in Tarim river basin.

Keywords: lower Tarim River; *Populus euphratica* forest; digging dike and cutting root; root sucker; update the rejuvenation